

Низкокогерентная рефлектометрия случайно-неоднородных сред: основные подходы к обработке данных

Е.В. Ушакова¹, А.Ф. Дорогов¹, Д.А. Зимняков^{1,2}

¹Саратовский государственный технический университет, Политехническая 77, Саратов, Россия, 410054

²Институт проблем точной механики и управления РАН, Рабочая 24, Саратов, Россия, 410028

Аннотация. Обсуждается метод низкокогерентной рефлектометрии (НКР) многократно рассеивающих случайно-неоднородных сред. Рассмотрены два подхода к анализу НКР данных, применяемых в зависимости от соотношения между предельной глубиной зондирования и характерным масштабом диффузного распространения зондирующего излучения в среде. Представлены результаты применения обоих подходов к диагностике различных случайно-неоднородных сред.

1. Введение

Метод низкокогерентной рефлектометрии, основанный на анализе выходного сигнала сканирующего интерферометра с низкокогерентным источником излучения и зондируемым объектом в качестве диффузного отражателя в опорном плече, является одним из перспективных методов оптической диагностики случайно-неоднородных сред [1-3]. Инструментальная реализация низкокогерентной рефлектометрической (НКР) диагностики может быть осуществлена на основе коммерчески доступных оптических когерентных томографов [1-3]. В процессе НКР зондирования осуществляется периодическая модуляция оптической длины опорного плеча низкокогерентного интерферометра; возрастание оптической длины приводит к увеличению глубины зондирования, и, соответственно к убыванию амплитуды детектируемого сигнала. По характеру спада сигнала в зависимости от глубины зондирования можно определить оптические транспортные параметры зондируемой среды (транспортную длину распространения излучения в среде, параметр анизотропии рассеяния, коэффициент поглощения среды, [4]). В отличие от оптической когерентной томографии (ОКТ), основанной на анализе зависимостей интенсивности обратно отраженных «баллистической» и малократно рассеянной составляющих регистрируемых сигналов от глубины зондирования и применяемой для диагностики и визуализации слабо рассеивающих сред со слоистой структурой, НКР метод использует в качестве информативной составляющей сигнала его многократно рассеянные компоненты, распространяющиеся в зондируемой среде преимущественно в диффузионном режиме. С целью уменьшения влияния спекл-модуляции детектируемого сигнала, обусловленной стохастической интерференцией парциальных составляющих многократно рассеянного зондирующего излучения, при НКР зондировании

применяется предварительная усредняющая обработка детектируемого сигнала по группе А-сканов, регистрируемых с близко расположенных локальных областей зондируемого образца.

2. Физические принципы

Рассматривая случай НКР зондирования многократно рассеивающей среды в форме плоского слоя толщиной L и используя аналогии между выходным сигналом низкокогерентного интерферометра и временным откликом среды при ее зондировании коротким световым импульсом, в рамках диффузионного приближения теории переноса излучения можно записать следующее выражение [1] для интенсивности регистрируемого при использовании НКР сигнала:

$$I(z) \cong K \exp\left(-\frac{z}{l_a}\right) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 l^*}{3\tilde{L}^2} z\right) \right\} \cdot \left[1 - \cos\left(2\pi n \frac{l^* + Z_1}{\tilde{L}}\right) \right], \quad (1)$$

где K – нормировочный коэффициент с размерностью плотности мощности (Вт/см^2); l_a – длина поглощения зондирующего излучения; $\tilde{L} = L + l^*(Z_1 + Z_2)$ – приведенная толщина слоя среды; Z_1, Z_2 – безразмерные коэффициенты, определяемые отражательной способностью верхней и нижней границ слоя; l^* – транспортная длина распространения излучения в слое; z – глубина

зондирования. Для сред с малым поглощением $l_a \rightarrow \infty$ и, соответственно, $\exp\left(-\frac{z}{l_a}\right) \rightarrow 1$ в интервале применяемых глубин зондирования образца.

Транспортная длина l^* представляет значительный интерес как диагностический параметр, поскольку она непосредственно определяется структурными и оптическими характеристиками зондируемой среды (плотностью упаковки рассеивающих центров, их характерным размером, значениями диэлектрической проницаемости или показателя преломления рассеивателей и окружающей среды). Анализируя выражение (1), можно установить, что характер убывания I с ростом глубины зондирования существенным образом зависит от соотношения между z параметром. В частности, при больших оптических толщинах зондируемых слоев, когда параметр существенно превосходит глубину зондирования во всем используемом интервале ее значений, интенсивность регистрируемого НКР сигнала убывает по степенному закону (

$I(z) \sim z^{-1.5}$). В случае же, когда $z > \frac{3\tilde{L}^2}{\pi^2 l^*}$, имеет место экспоненциальный спад сигнала с

возрастанием глубины зондирования: $I(z) \sim \exp\left(-\frac{z}{\zeta}\right)$, где параметр затухания $\zeta = \frac{3\tilde{L}^2}{\pi^2 l^*}$.

Таким образом, измеренное в эксперименте значение ζ может быть использовано для определения транспортной длины при известных значениях толщины образца и параметров Z_1, Z_2 . В частности, для сильно рассеивающих образцов, когда $\tilde{L} \gg l^*$ и членом $l^*(Z_1 + Z_2)$ можно пренебречь по сравнению с геометрической толщиной образца, задача определения транспортной длины по скорости спада интерференционного сигнала еще более упрощается.

3. Результаты

Вышеупомянутый подход можно проиллюстрировать результатами НКР зондирования [2] тонких полимерных слоев (уплотнительная фторопластовая лента толщиной 100 мкм) и слоев плотноупакованных частиц диоксида титана (средний диаметр частиц 25 нм, толщина слоев 200-250 мкм, объемная доля частиц в слоях ≈ 0.23). В качестве низкокогерентного рефлектометра использовался оптический когерентный томограф Thorlabs OCS1300SS со свипированием частоты (средняя длина волны 1325 нм, эффективная длина когерентности 12 мкм). На рисунке 1 представлены типичные зависимости нормированного НКР сигнала от глубины зондирования для двух исследованных образцов (значения z представлены для свободного пространства без учета показателя преломления зондируемой среды n_{eff}). Интервалы экспоненциального затухания сигналов перекрывают более полутора декад. Особенностью эмпирической зависимости для образца полимерной пленки является пик, обусловленный френелевским отражением зондирующего пучка от нижней границы слоя

(максимумы сигнала, вызванные отражениями от границ, указаны стрелками). Для слоев наночастиц этот пик не наблюдается, поскольку $\tilde{L} \gg l^*$. Таким образом, $\xi = 750 \pm 30$ мкм для образцов полимерной пленки и 1250 ± 50 мкм для слоев наночастиц диоксида титана.

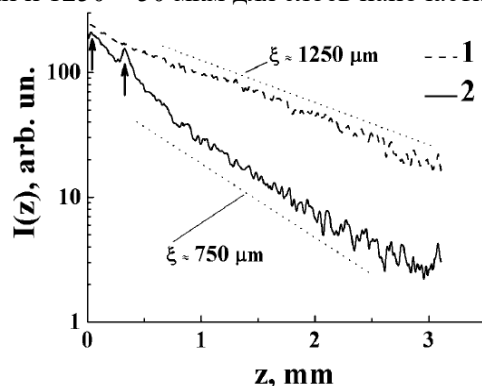


Рисунок 1. Зависимости усредненных по ансамблю НКР сигналов от глубины зондирования. 1 – слой TiO₂ частиц толщиной ≈ 230 мкм; 2 – полимерная пленка.

Соответственно, оценка значений транспортной длины для исследованных образцов дала величины $\approx 21.2 \pm 1.3$ мкм (для слоя наночастиц) и $\approx 115 \pm 7$ мкм (для полимерной пленки), которые хорошо согласуются со значениями, определенными с использованием других методов (в частности, по измеренным коэффициентам диффузного пропускания образцов).

Применительно к случаю $z \leq \frac{3\tilde{L}^2}{\pi^2 l^*}$, когда затухание НКР сигнала имеет степенной характер или имеет место кроссовер между степенным и экспоненциальным режимами затухания, может быть предложен иной подход к оценке транспортной длины, основанный на использовании взаимосвязи между транспортной длиной и интегральным рефлектометрическим сигналом

$\tilde{I} = \int_0^{z_{\max}} I(z) dz$ для заданных условий НКР зондирования. Физические принципы данного подхода иллюстрируются рисунком 2 (здесь z_{\max} – предельная глубина НКР зондирования). Эффект убывания интегрального значения НКР сигнала при возрастании транспортной длины распространения излучения в слое в случае фиксированной площади зоны детектирования ($\approx \frac{\pi d^2}{4}$) обусловлен ростом линейных размеров зоны локализации рассеянного света в образце).

Зависимость $\tilde{I}(l^*)$ при заданной толщине слоя и диаметре зоны детектирования d может быть получена на основе Монте-Карло моделирования переноса излучения в слое. Для экспериментальной верификации обсуждаемого подхода были использованы данные НКР зондирования эволюционирующих слоев метастабильных модельных жидких пен. Толщина слоев была равна 1 мм. Отметим, что при заданных толщинах, типичных значениях транспортной длины порядка нескольких десятков микрон и предельной глубине зондирования

OCS1300SS около 3 мм справедливо соотношение $z \ll \frac{3\tilde{L}^2}{\pi^2 l^*}$.

На рис. 3 представлена теоретическая зависимость нормированного интегрального НКР сигнала от отношения транспортной длины к геометрической толщине образца, полученная в результате Монте-Карло моделирования (нормировка осуществлена на значение интегрального сигнала, соответствующего случаю зондирования полубесконечного слоя).

Отметим, что \tilde{I}_{norm} демонстрирует близкую к обратной линейной зависимость от параметра $\frac{l^*}{\tilde{L}}$ при его возрастании. На рис. 4 представлена полученная в эксперименте зависимость

нормированного интегрального НКР сигнала от времени старения слоя метастабильной пены. Нормировка осуществлялась на значение интегрального НКР сигнала от отражательного стандарта с коэффициентом диффузного отражения, равным 0.98 на длине волны зондирующего излучения.

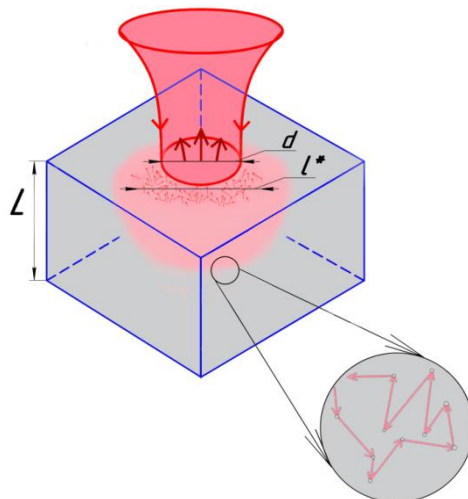


Рисунок 2. Схема, иллюстрирующая эффект убывания интегрального НКР сигнала с ростом транспортной длины распространения зондирующего излучения в слое среды.

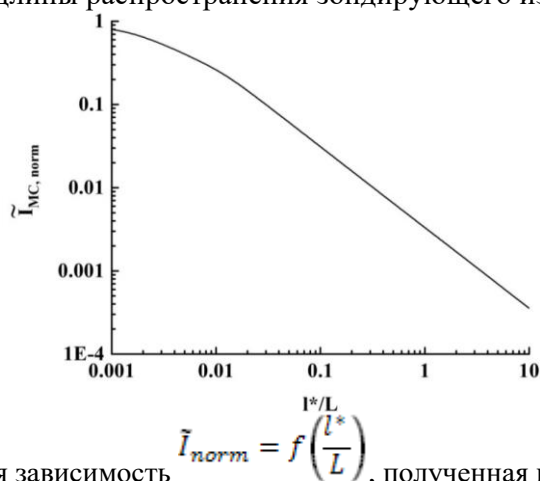


Рисунок 3. Теоретическая зависимость $\tilde{I}_{norm} = f\left(\frac{l^*}{L}\right)$, полученная в результате Монте-Карло моделирования.

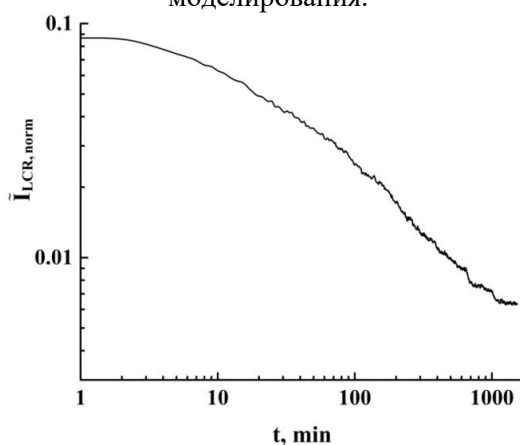


Рисунок 4. Нормированный интегральный НКР сигнал для слоя эволюционирующей модельной пены в зависимости от времени старения.

Рисунок 5 иллюстрирует процедуру восстановления транспортной длины распространения излучения в слое эволюционирующей пены по измеренному нормированному интегральному НКР сигналу.

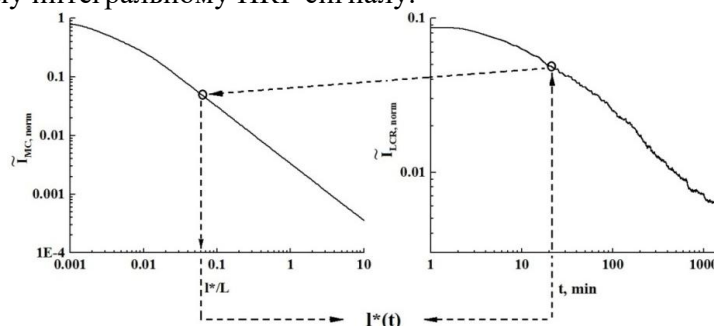


Рисунок 5. Процедура восстановления зависимости транспортной длины распространения излучения в слое пены от времени старения слоя.

На рис. 6 приведена восстановленная зависимость транспортной длины от времени старения для слоя метастабильной модельной пены (в качестве последней в эксперименте использована бритвенная пена Gillette). Пунктирная линия соответствует автомодельному режиму развития пены. Полученные данные хорошо согласуются с оценками среднего размера поверхностных газовых пузырей в слое пены (по изображениям поверхности слоя в различные моменты времени), поскольку средний размер газовых пузырей связан с транспортной длиной линейной зависимостью.

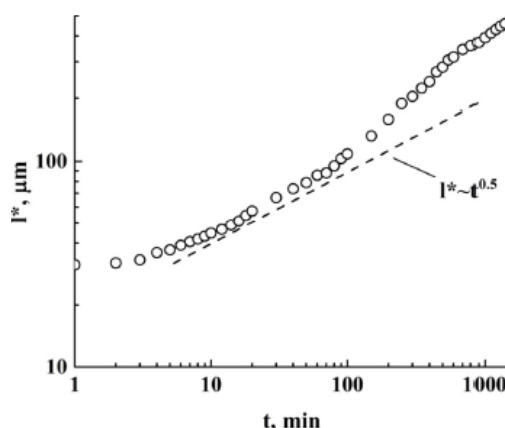


Рисунок 6. Восстановленная зависимость транспортной длины распространения излучения в слое эволюционирующей пены от времени старения.

4. Заключение

Таким образом, в данной работе представлены различные подходы к интерпретации данных низкокогерентного рефлектометрического зондирования случайно-неоднородных сред, применимые для различных режимов распространения зондирующего излучения в среде. Результаты работы могут быть использованы для анализа структуры биотканей в оптической биомедицинской диагностике и композитных материалов в физическом материаловедении.

5. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 18-29-06024.

6. Литература

- [1] Zymnyakov, D.A. Measurement of the transport-scattering coefficient in random inhomogeneous media using the method of low-coherence reflectometry / D.A. Zymnyakov, J.S. Sina, S.A. Yuvchenko, E.A. Isaeva, S.P. Chekmasov // Technical Physics Letters. – 2014. – Vol. 40. – P. 132-134.

- [2] Zymnyakov, D.A. Low-coherence interferometry as a method for assessing the transport parameters in randomly inhomogeneous media / D.A. Zymnyakov, J.S. Sina, S.A. Yuvchenko, E.A. Isaeva, S.P. Chekmasov, O.V. Ushakova // Quantum Electronics. – 2014. – Vol. 44. – P. 44-54.
- [3] Ushakova, E.V. Optical Coherence Tomography of Tissues Using the Recovery of Depth Distributions of the Backscattering Efficiency / E.V. Ushakova, S.A. Yuvchenko, E.M. Artemina, A.A. Isaeva, E.A. Isaeva, D.A. Zimnyakov // 18th International Conference on Laser Optics (ICLO), 2018.
- [4] Исимару, А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах – М.: Мир, 1981. Т. 1. – 280 с.

Low-coherence reflectometry of random media: basis approaches to data processing

E.V. Ushakova¹, A.F. Dorogov¹, D.A. Zimnyakov^{1,2}

¹Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Politehnicheskaya 77, Saratov, Russia, 410054

²Institute of Precision Mechanics and Control of the Russian Academy of Sciences, Rabochaya 24, Saratov, Russia, 410028

Abstract. A technique of low-coherence reflectometry (LCR) of multiple scattering random media is discussed. Two approaches to analysis of LCR data, which are applied depending on the ratio between the maximal probe depth and the characteristic scale of diffuse propagation of a probe light in a medium, are considered. The examples of application of both approaches to diagnostics of various random media are presented.